

ANALISIS ARUS PERALIHAN GANGGUAN HUBUNG SINGKAT TIGA FASA PADA GENERATOR SINKRON MENGGUNAKAN METODE PARK D-Q

Suwitno

Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Riau
Kampus Bina Widya Km 12,5 Panam-Riau, 28293 Indonesia.

ABSTRAK

Analisis kinerja arus gangguan tiga fasa pada generator sinkron 3 tga disajikan pada tulisan ini. Kondisi kinerja gangguan terjadi pada generator sinkron disebabkan perubahan beban listrik secara mendadak. Penyelesaian analisis secara teori, melibatkan suatu situasi elektromagnetik yang rumit dan operasi matematika yang sulit. Berdasarkan persamaan umum park d-q dengan menempatkan sumbu d-q pada sudut berubah ubah dapat diperoleh. Tulisan ini menunjukkan bahwa persamaan kinerja dari generator sinkron menggunakan metoda park d-q menjadi sederhana dan solusi yang sangat sederhana. Hasil simulasi memberikan informasi penting untuk pemilihan CB yang sesuai dan peralatan proteksi seperti nilai parameter arus listrik maksimum

Kata Kunci : Arus Gangguan Tiga Fasa, Metode Park D-Q

Pendahuluan

Saat terjadi gangguan seperti halnya hubung singkat pada sistem, mesin sebagai generator akan mengirimkan arus hubung singkat untuk beberapa siklus setelah hubung singkat terjadi. Arus yang dihasilkan, dapat menghasilkan arus hubung singkat dengan magnitude yang sangat besar sekitar 10 sampai 15 kali kuat arus nominalnya. Jika arus hubung singkat yang besar ini, dikonsumsi oleh peralatan listrik, maka dapat mengakibatkan resiko kerusakan pada peralatan. Untuk mengatasi resiko kerusakan peralatan akibat arus hubung singkat, dipergunakan suatu peralatan pengaman yang disebut sistem proteksi. Menentukan arus hubung singkat pada sistem tenaga listrik mempunyai tujuan untuk memilih pemutus rangkaian (circuit breaker) atau fuse yang sesuai dan peralatan proteksi lain yang sesuai. Pedoman dalam pemilihan alat pengaman (CB) dan peralatan proteksi lainnya biasanya menggunakan suatu analisis teoritis yang lengkap dan melibatkan suatu situasi elektromagnetik yang rumit dan operasi matematika yang sulit. Pendekatan yang biasa dilakukan adalah melakukan analisis kinerja peralihan pada generator sinkron saat terjadi hubung singkat. Kondisi peralihan pada generator disebabkan

oleh perubahan beban listrik atau mekanik secara tiba-tiba.

Menentukan arus maksimum hubung singkat bukan merupakan hal yang baru, tetapi pada umumnya penentuan dengan menggunakan metode konvensional. Analisis metode konvensional tersebut, menghasilkan suatu persamaan fluksi, tegangan dan arus generator yang berorder 5 (lima).

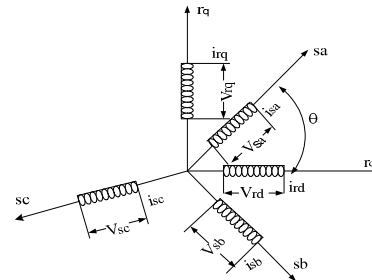
Ogbonnaya I Okoro, (2005) telah menyajikan analisis peralihan pada sistem bantalan magnet aktif dengan menggunakan model matematis variable keadaan orde 6 (enam). Analisis sistem orde enam selama peralihan ini, dilakukan dengan bantuan program komputasi (Range – Kutta).

Suwitno, Eddy Hamdani, (2005) telah menyajikan analisis transient arus hubung singkat dua fasa pada transformator dengan menggunakan metoda park $\alpha\beta$ khususnya hubung singkat fasa 1 dan fasa 2. Analisis ini telah diperoleh unjuk kerja arus hubung singkat dan waktu peralihan pada saat terjadinya hubung singkat disisi beban. Analisis peralihan dengan solusi park $\alpha\beta$ sangat sulit, karena parameter mutual induktansinya merupakan fungsi terhadap waktu.

Yanuarsyah Haroen, Pekik Argo Dahono, (1984) telah menyajikan analisis motor tak serempak tiga fasa dengan metoda Park Komplek. Dalam analisis ini dilakukan dengan mengabaikan parameter tahanan di sisi stator dan rotor. Dari hasil simulasi telah diperoleh informasi penting berupa besaran listrik maksimum seperti tegangan, arus, dan torsi maksimum yang digunakan dalam disain inverter dan motor listrik.

Permasalahan pada tulisan ini adalah proses perhitungan dalam menentukan besaran hubung singkat dengan metoda konvensional, mempunyai parameter perancangan yang cukup rumit dan kompleks. Berdasarkan permasalahan tersebut diatas tulisan ini mencoba untuk menyederhanakan metoda konvensional (sistem orde lima) tersebut yaitu dengan mengajukan analisis peralihan arus hubung singkat tiga fasa pada generator 3 fasa dengan metoda park d-q. Sistem d-q adalah suatu sistem yang mengambil sumbu horizontal sebagai sumbu d dan sumbu vertikal sebagai sumbu q. Pemodelan tersebut konsekuensinya parameter perancangan menjadi sederhana sehingga penentuan parameter yang dibutuhkan untuk mendapatkan kinerja yang diinginkan semakin cepat.

Dalam pembahasan diambil model generator listrik 3 fasa silindris, yang mempunyai 3 belitan simetris pada sisi stator, dan 2 belitan pada sisi rotor. Bentuk fisik generator sinkron jenis silindris listrik 3 fasa silindris dapat ditunjukkan pada gambar 1.



Gambar 1. Pemodelan generator Sinkron Silindris 3 fasa yang terdiri dari 3 belitan stator dan 2 fasa belitan rotor

Pemodelan ruang vektor secara langsung akan diperoleh persamaan mesin sinkron yang mempunyai order 5×5 . Hubungan persamaan fluksi listrik dan arus dapat ditulis :

$$[\phi] = [L(\theta)][i] \dots\dots\dots(1)$$

dimana

$[\phi]$: matrik kolom fluksi $L[\theta]$: matrik induktansi $[i]$: matrik kolom arus

Untuk mesin listrik 3 fasa hubungan yang lebih lengkap dapat dirinci sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{sr} \cos\theta & M_{sr} \sin\theta \\ M_{sr} \cos\lambda_1 & M_{sr} \sin\lambda_1 \\ M_{sr} \cos\lambda_2 & M_{sr} \sin\lambda_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \phi_{rd} \\ \phi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{sr} \cos\theta & M_{sr} \cos\lambda_1 & M_{sr} \cos\lambda_2 \\ M_{sr} \sin\theta & M_{sr} \sin\lambda_1 & M_{sr} \sin\lambda_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_r & 0 \\ 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix}$$

.....(2)
dengan

L_s adalah matrik induktansi sendiri stator, L_r adalah matrik induktansi sendiri rotor.

$M_{sr}(\theta)$ adalah matrik induktansi mutual stator dan rotor.

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \\ V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s & M_{sr} \cos\theta & M_{sr} \sin\theta \\ M_s & L_s & M_s & M_{sr} \cos\lambda_1 & M_{sr} \sin\lambda_1 \\ M_s & M_s & L_s & M_{sr} \cos\lambda_2 & M_{sr} \sin\lambda_2 \\ M_{sr} \cos\theta & M_{sr} \cos\lambda_1 & M_{sr} \cos\lambda_2 & L_r & 0 \\ M_{sr} \sin\theta & M_{sr} \sin\lambda_1 & M_{sr} \sin\lambda_2 & 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \frac{d\theta}{dt} \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s & M_{sr} \cos\theta & M_{sr} \sin\theta \\ M_s & L_s & M_s & M_{sr} \cos\lambda_1 & M_{sr} \sin\lambda_1 \\ M_s & M_s & L_s & M_{sr} \cos\lambda_2 & M_{sr} \sin\lambda_2 \\ M_{sr} \cos\theta & M_{sr} \cos\lambda_1 & M_{sr} \cos\lambda_2 & L_r & 0 \\ M_{sr} \sin\theta & M_{sr} \sin\lambda_1 & M_{sr} \sin\lambda_2 & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix}$$

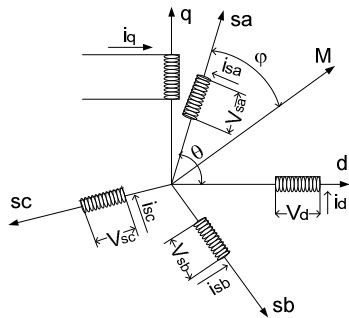
.....(3)

Persamaan Tegangan

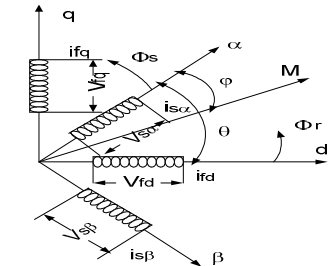
Secara rinci persamaan tegangan yang ada dapat ditulis; dengan $\lambda_1 = \theta - 2\pi/3$ dan $\lambda_2 = \theta - 4\pi/3$. Analisis peralihan dengan menggunakan solusi persamaan diatas sangat sulit karena mengandung koefisien yang

berubah terhadap waktu sebagai akibat adanya induktansi mutual yang merupakan fungsi dari posisi rotor. Untuk itu digunakan metoda park d-q yang akan mentransformasikan sistem 3 fasa menjadi 2 fasa. Rangkaian ekivalen transformasi 3fasakesistem khayal 2 fasa, tidak menghilangkan

prinsip-prinsip yang sebenarnya, karena dalam mentransformasikan menggunakan harga-harga matrik transformasi dasar $[A]$ dan $[A]^{-1}$. Penentuan matrik transformasi dasar $[A]$ dan $[A]^{-1}$ dengan menggunakan analisa kerapatan fluksi, dapat ditunjukkan pada gambar 2 dan gambar 3 dengan 2 vektor saling tegak lurus, dipilih sedemikian rupa $s\alpha$ berhimpit dengan s_a . Pada gambar 2 dan gambar 3 terdapat suatu titik M dalam ruang, dengan menggunakan analisis kerapatan fluksi ditiik M oleh 3 fasa (B_{M3}) sama dengan kerapatan fluksi sistem 2 fasa (B_{M2})



Gambar 2. Model mesin sinkron silindris dengan titik M dalam ruang vektor sistem 3 fasa variabel abc



Gambar 3. Model mesin sinkron silindris dengan titik M dalam ruang vektor sistem 2 fasa variabel

$$B_{M3} = kn_3 \begin{pmatrix} i_{sa} \cos \varphi + i_{sb} \left(-\frac{1}{2} \cos \varphi + \frac{1}{2} \sqrt{3} \sin \varphi \right) + \dots \\ i_{sc} \left(-\frac{1}{2} \cos \varphi - \frac{1}{2} \sqrt{3} \sin \varphi \right) + \dots \\ i_d \cos(\theta - \varphi) + i_q \sin(\theta - \varphi) \end{pmatrix}$$

$$B_{M2} = i_{s\alpha} \cos \varphi + i_{s\beta} \sin \varphi + i_d \cos(\theta - \varphi) + i_q \sin(\theta - \varphi)$$

Mengingat $B_{M3} = B_{M2}$ dan pemisahan komponen fluksi dalam faktor $\cos \theta$, $\sin \theta$, $\cos(\theta - \varphi)$, dan $\sin(\theta - \varphi)$ dapat diperoleh hubungan :

$$\begin{bmatrix} i_{so} \\ i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & a & a \\ 1 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 0 & \frac{1}{2}\sqrt{3} & -\frac{1}{2}\sqrt{3} \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix}$$

dimana a bilangan yang harus memenuhi persyaratan matrik orthonormal, karena matrik $[A_{sa}]$ adalah matrik orthonormal sudah pasti bersifat orthogonal, sehingga terdapat hubungan $[A]^t = [A]^{-1}$. Jadi inverse matrik $[A]^{-1}$:

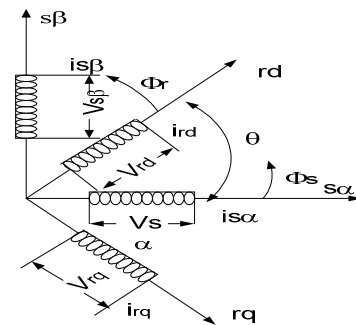
$$[A]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \bullet \begin{bmatrix} \frac{1}{2}\sqrt{2} & \frac{1}{2}\sqrt{2} & \frac{1}{2}\sqrt{2} \\ 1 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 0 & \frac{1}{2}\sqrt{3} & -\frac{1}{2}\sqrt{3} \end{bmatrix}$$

dan $[A] = \sqrt{\frac{2}{3}} \bullet \begin{bmatrix} \frac{1}{2}\sqrt{2} & 1 & 0 \\ \frac{1}{2}\sqrt{2} & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2}\sqrt{3} \\ \frac{1}{2}\sqrt{2} & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2}\sqrt{3} \end{bmatrix}$

Dari hujung diatas, sistem yang baru variabel sumbu $\alpha\beta$ terhadap sumbu abc adalah:

$$[X_{\alpha\beta os}] = [A]^{-1} \bullet [X_{abc_s}] \dots \dots \dots (4)$$

Kemudian dari gambar 1 dapat diekivalenkan menjadi gambar 4, melalui transformasi sumbu $\alpha\beta$ - sumbu dq seperti dibawah ini:



Gambar 4. Model Mesin sinkron belita stator 3 fasa diubah menjadi sistem khayal belitan 2 fasa $\alpha\beta$.

Dari gambar 4 didapat hubungan fluks dan arus ;

$$\begin{aligned} \phi_{rd} &= L_r i_{rd} + m_{sr} (i_{s\alpha} \cos \theta + i_{s\beta} \sin \theta) \\ \phi_{rq} &= L_s i_{s\beta} + m_{sr} (i_{s\alpha} \sin \theta - i_{s\beta} \cos \theta) \end{aligned}$$

atau dapat ditulis dalam bentuk matrik diperoleh hubungan :

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ \sin \theta & -\cos \theta \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \\ X_o \end{bmatrix} \quad \text{atau}$$

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ \sin \theta & -\cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \\ X_o \end{bmatrix}$$

Dari hujung diatas dapat ditulis :

$$[X_{dqo}] = [B_s]^{-1} \bullet [X_{\alpha\beta o}] \dots\dots\dots(5)$$

dimana :

$$[B_s]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ \sin \theta & -\cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \text{ sedangkan matrik}$$

$[B_s]$ adalah

$$[B_s] = \frac{\text{adjo int}[B_s]^{-1}}{\det[B_s]^{-1}}, \quad \text{sehingga}$$

$$\text{matrik } [B_s] = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & -\cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Kemudian dari hubungan gambar1 dan gambar 4 didapat hubungan:

$$[X_{\alpha\beta o}] = [A] \bullet [X_{abc s}] \quad \text{dan}$$

$$[X_{dqo}] = [B_s]^{-1} [X_{\alpha\beta o}]$$

Jika diambil persamaan (4) dan persamaan (5) dan disubsitusikan akan diperoleh :

$$[X_{dqo}] = [K]^{-1} \bullet [X_{abc}] \dots\dots\dots(6)$$

Sehingga diperoleh hubungan transformasi dasar sebagai pengubah besaran baru (rangka referensi) sumbu dq dan sumbu variabel abc yang kita kenal matrik A :

$$[K]^{-1} = [B_s]^{-1} [A]^{-1}$$

Sehingga diperoleh inverse matrik $[K]$:

$$[K]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - 2\pi/3) & \sin(\theta - 4\pi/3) \\ \frac{1}{2}\sqrt{2} & \frac{1}{2}\sqrt{2} & \frac{1}{2}\sqrt{2} \end{bmatrix}$$

Dengan aturan adjoin matrik inverse $[K]^{-1}$, diperoleh matrik $[K]$:

$$[K] = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 1 \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \sin(\theta - 2\pi/3) & 1 \\ \cos(\theta - 4\pi/3) & \sin(\theta - 4\pi/3) & 1 \end{bmatrix}$$

Berdasarkan transformasi baru inverse matrik A diperoleh hubungan antara arus baru I_{dqo} dan arus lama i_{abc} :

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_o \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - 2\pi/3) & \sin(\theta - 4\pi/3) \\ \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(7)$$

Dari menginversikan transformasi matrik $[A]^{-1}$ dapat diperoleh hubungan antara matrik arus stator i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} dengan arus 2 fasa i_d, i_q , dan i_o (belitan rotor)

$$\begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 1 \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \sin(\theta - 2\pi/3) & 1 \\ \cos(\theta - 4\pi/3) & \sin(\theta - 4\pi/3) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_o \end{bmatrix} \dots\dots\dots(8)$$

Dari persamaan matrik arus diatas secara eksak dapat juga didefinisikan hubungan antara tegangan rotor terhadap tegangan stator :

$$\begin{bmatrix} e_d \\ e_q \\ e_o \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - 2\pi/3) & \sin(\theta - 4\pi/3) \\ \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{sa} \\ e_{sb} \\ e_{sc} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(9)$$

Persamaan tegangan aktualnya dapat diperoleh dengan inverse transformasi pada persamaan (9) yang akhirnya diperoleh persamaan sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} e_{sa} \\ e_{sb} \\ e_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 1 \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \sin(\theta - 2\pi/3) & 1 \\ \cos(\theta - 4\pi/3) & \sin(\theta - 4\pi/3) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_d \\ e_q \\ e_o \end{bmatrix} \dots\dots\dots(10)$$

Tegangan jangkar e_a yang dibangkitkan oleh generator adalah jumlah dari tegangan internal yang disebabkan fluksi celah udara dan fluksi utama dikurangi fluksi-fluksi jangkar lokal, dan tegangan akibat resistansi belitan jangkar $r_a i_a$. Dengan menggunakan hubungan komponen simetris $i_a + i_b + i_c = 3i_o$, dan nilai disubsitusikan pada persamaaan (8), sehingga persamaan menjadi:

$$e_a = p(\phi_d \cos \theta + \phi_q \sin \theta) + L_o p i_o + r_a i_a \dots\dots(11)$$

Dengan cara yang sama akan diperoleh tegangan jangkar pada fasa lainnya:

$$e_b = p(\phi_d \cos(\theta - 2\pi/3) + \phi_q \sin(\theta - 2\pi/3)) + L_o p i_o + r_a i_a \dots \dots \dots (12)$$

$$e_c = p(\phi_d \cos(\theta - 4\pi/3) + \phi_q \sin(\theta - 4\pi/3)) + L_o p i_o + r_a i_a \dots \dots \dots (13)$$

Dimana besaran baru diatas adalah:

$$L_a = L_s + L_m, \quad L_o = L_a - 3L_m, \quad \phi_d = \phi_{md} + L_a \cdot i_d, \text{ dan } \phi_q = \phi_{mq} + L_a \cdot i_q$$

Besaran ϕ_d dan ϕ_q adalah fluksi lingkup total.

Persamaan untuk tegangan e_b , e_q , dan e_o dapat diperoleh dengan mengembangkan dan menyusun kembali persamaan diatas dengan menggunakan nilai i_a dan e_a dari transformasi persamaan (8) dan (10) dan hasil diferensial $\frac{\partial \theta}{\partial t}$ atau yang biasa ditulis $p\theta = \omega$, sehingga diperoleh persamaan sebagai berikut :

$$e_a = e_d \cos \theta + e_q \sin \theta + e_o \dots \dots \dots (14)$$

Kemudian persamaan (11) disubsitusikan ke persamaan (14) menjadi :

$$e_{sd} = p\phi_{sd} + \omega\phi_{sq} + r_s i_{sd}$$

$$e_{sq} = -\omega\phi_{sd} + p\phi_{sq} + r_a i_{sq} \dots \dots \dots (15)$$

$$e_o = (r_s + pL_o) i_o$$

Jika dalam keadaan mantap tegangan dan arus tiga fasa dalam kondisi seimbang, maka besaran e_o dan i_o mempunyai nol. Dengan kata lain tidak mempengaruhi sistem, sehingga persamaan menjadi

$$e_{sd} = p\phi_{sd} + \omega\phi_{sq} + r_s i_{sd} \dots \dots \dots (16)$$

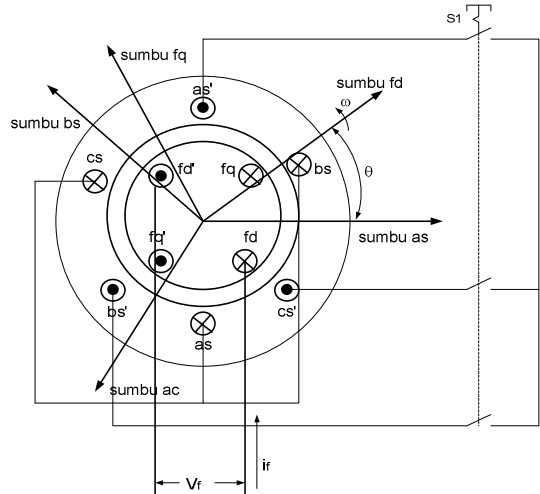
$$e_{sq} = -\omega\phi_{sd} + p\phi_{sq} + r_s i_{sd}$$

Kemudian dengan mengembangkan dari persamaan (7) dan (9) diperoleh tegangan yang didapat pada rotor :

$$e_{rd} = r_r i_{rd} + p\phi_{rd} \dots \dots \dots (17)$$

$$e_{rq} = r_r i_{rd} + p\phi_{rq}$$

Dengan memperhatikan gambar 5. suatu mesin sinkron yang diberi tegangan eksitasi V_f dan dialiri arus eksitasi I_f dan dilengkapi belitan peredam f_q-f_q' , dengan dilengkapi saklar untuk menghubungkan singkatkan beban. Dengan tujuan untuk melihat respon transien mesin sinkron pada saat terjadi hubung singkat.



Gambar 5. Menunjukkan mesin sinkron dengan dilengkapi saklar untuk menghubungkan singkatkan beban.

Pada saat saklar S1 masih terbuka dengan kata lain kondisi mesin sinkron tanpa beban persamaan arus, fluksi, dan tegangan sebagai berikut:

Pada saat tanpa beban arus beban adalah nol sedangkan arus eksitasi besarnya adalah i_f ampere.

Besaran aliran arus yang mengalir pada sisi stator maupun rotor

$$i_{sa} = i_{sb} = i_{sc} = 0$$

$$i_{sd} = i_{sq} = 0$$

$$i_{ra} = i_{rb} = i_{rc} = 0$$

$$i_{rd} = i_f$$

$$i_{rq} = 0$$

Keadaan distribusi fluksi yang melewati distator maupun dirotor

$$\phi_{sd} = L_s \cdot 0 + L_{sr} i_f = L_{sr} i_f$$

$$\phi_{sq} = L_s \cdot 0 + L_{sr} \cdot 0 = 0$$

$$\phi_{rd} = L_r i_f + L_{sr} \cdot 0 = L_r i_f$$

$$\phi_{rq} = L_r \cdot 0 + L_{sr} \cdot 0 = 0$$

Keadaan tegangan yang terjadi di distator maupun dirotor

$$e_{sd} = r_s \cdot 0 + p(L_{sr} i_f) + \omega \cdot 0 = p(L_{sr} i_f)$$

$$e_{sq} = r_s \cdot 0 - \omega(L_{sr} i_f) + p \cdot 0 = -\omega(L_{sr} i_f)$$

$$e_{rd} = r_r i_f + p(L_r i_f)$$

$$e_{rq} = r_r \cdot 0 + p \cdot 0 = 0$$

Pada saat saklar dioperasikan atau ditekan maka disisi beban terjadi hubungan singkat. Besaran tegangan hubung singkat pada saat terjadi hubung singkat adalah tegangan terminal jangkar semuanya bernilai nol,

sedangkan tegangan pada catu daya eksitasi tetap sebesar V_f sehingga diperoleh besaran seperti dibawah ini :

$$e_{sa} = e_{sb} = e_{sc} = 0 \quad \text{dan} \quad e_{rd} = V_f$$

$$e_{sd} = e_{sq} = 0 \quad \quad \quad e_{rq} = 0$$

Jadi perubahan tegangan dari kondisi hubung singkat dan bebannol adalah :

$$\Delta e_{sd} = e_{sd-hs} - e_{sd-bn} = 0$$

$$\Delta e_{sq} = e_{sq-hs} - e_{sq-bn} = -\omega L_{sr} \cdot i$$

$$\Delta e_{rd} = e_{rd-hs} - e_{rd-bn} = V - V = 0$$

$$\Delta e_{rq} = e_{rq-hs} - e_{rq-bn} = 0 - 0 = 0$$

Persamaan matrik diatas kita pisahkan parameter koefisien arus yang mengandung diferensial dan yang tidak, sehingga diperoleh matrik dibawah ini:

$$\begin{bmatrix} \Delta e_{sd} \\ \Delta e_{sq} \\ \Delta e_{rd} \\ \Delta e_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s & \omega L_s & 0 & \omega L_{sr} \\ -\omega L_s & r_s & -\omega L_{sr} & 0 \\ 0 & 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_{sd} \\ \Delta i_{sq} \\ \Delta i_{rd} \\ \Delta i_{rq} \end{bmatrix} + \dots$$

$$\begin{bmatrix} L_s & 0 & L_{sr} & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_{sr} \\ L_{sr} & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_{sr} & 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot p \begin{bmatrix} \Delta i_{sd} \\ \Delta i_{sq} \\ \Delta i_{rd} \\ \Delta i_{rq} \end{bmatrix} \quad (18)$$

Metode Penelitian

Bahan yang dipergunakan pada tulisan ini generator sinkron rotor silindris tiga fasa dengan daya 0,3 kW, tegangan eksitasi 150 Volt, putaran 2500 rpm, arus eksitasi 0,2 Ampere. Untuk menguji gejala peralihan arus hubung singkat pada generator sinkron 3 fasa, dipergunakan metodologi meliputi; memodelkan bentuk fisik mesin listrik yang sebenarnya kedalam bentuk rangkaian ekuivalen. Kemudian merubah rangkaian ekuivalen 3 fasa (variabel abc) menjadi 2 fasa (variabel $\alpha\beta$) dan menentukan persamaan generator listrik serta persamaan transformasi dari variabel fasa abc menjadi variabel $\alpha\beta$. Kemudian merubah sistem $\alpha\beta$ ke sistem dq serta menentukan persamaan transformasi dari variabel fasa $\alpha\beta$ menjadi variabel dq. Menentukan suatu persamaan generator listrik dalam keadaan beban nol untuk menentukan persamaan tegangan dan arus di stator dan di rotor, serta menentukan suatu persamaan mesin listrik dalam keadaan hubung singkat untuk

menentukan persamaan tegangan dan arus di stator dan di rotor.

Menghitung perubahan tegangan yang terjadi, dan menentukan hubungan antara perubahan tegangan dan perubahan arus. Akhirnya menghitung perubahan arus yang terjadi dengan menyelesaikan persamaan differensial antara perubahan tegangan dan perubahan arus. Menghitung arus hubung singkat dan menguji validitas analisis proses perhitungan dan simulasi dilakukan dengan menggunakan komputer.

Hasil Penelitian

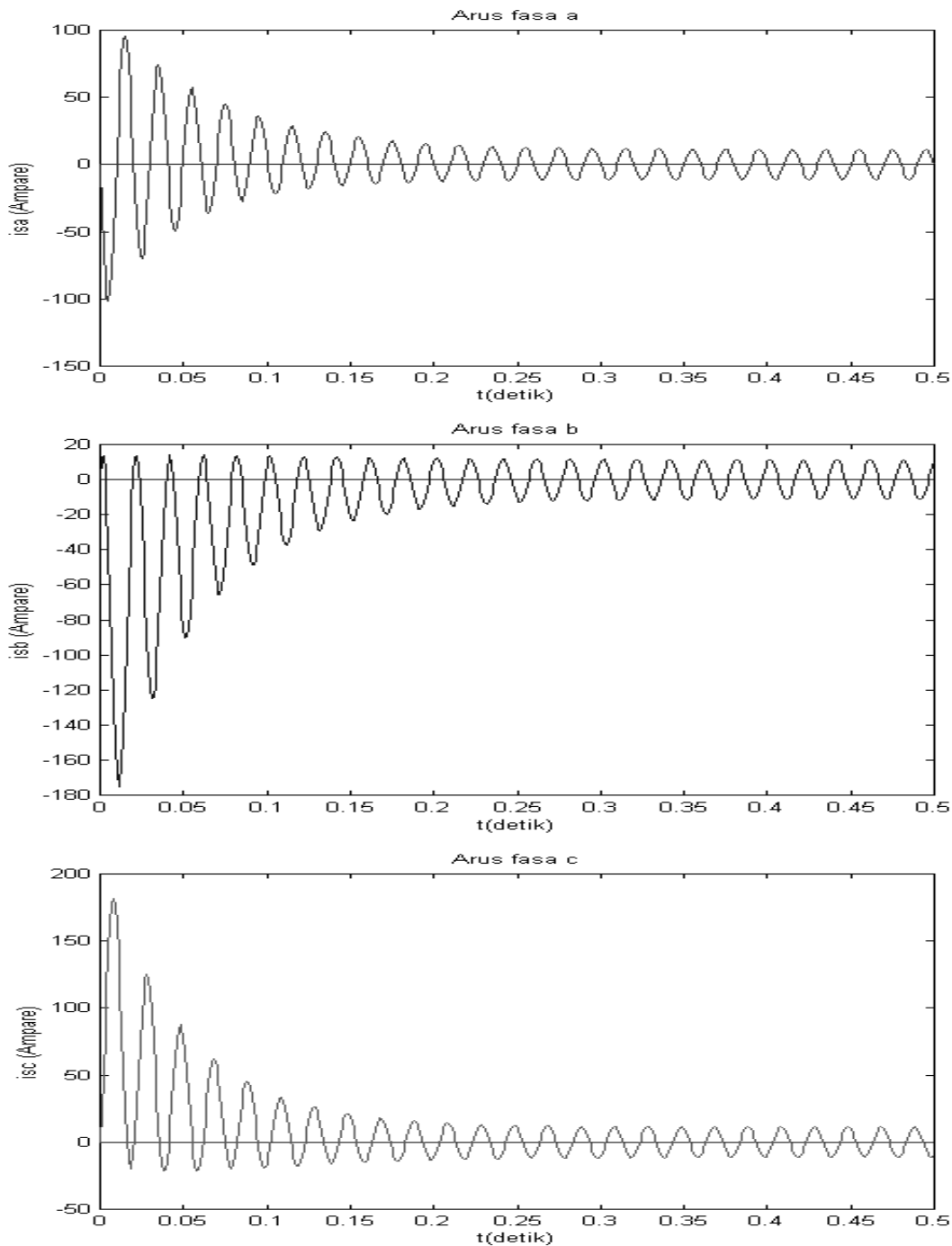
Sebagai ilustrasi digunakan generator sinkron silindris 3 fasa yang mempunyai rating daya 0,3 KW, $V_{eksitasi}$ 150 Volt, $V_{jangkar} = 220/380$ Volt. Berdasarkan hasil pengukuran diperoleh parameter; $R_s = 3,58 \Omega$, $R_r = 4,41 \Omega$, $L_r = 2,48$ Henry, $L_{sa} = L_{sb} = L_{sc} = 1,74$ Henry, arus eksitasi $i_f = 0,2$ Ampere, tegangan jangkar = 220 Volt, putaran mesin 2458 rpm(257,27 rad/detik). Hasil pengukuran diatas diperoleh parameter mutual induktansi antara belitan stator dan belitan rotor adalah :

$$M = \frac{V}{\omega \cdot i_f} = \frac{220 \text{ Volt}}{2.3,14 \cdot 2458 / 60 \text{ rad / det ik. } 0,2 \text{ A}} = 4,2757 \text{ H Si}$$

mulasi dilakukan dengan memecahkan persamaan diferensial (18) dengan menggunakan metoda integrasi trapezium. Besaran perubahan tegangan Δe_{sd} , Δe_{sq} , Δe_{rd} , dan Δe_{rq} telah diketahui, sehingga secara numerik dapat diperoleh harga perubahan arus Δi_{sd} , Δi_{sq} , Δi_{rd} , dan Δi_{rq} . Nilai arus peralihan system park d-q pada saat terjadi hubung singkat diperoleh dengan menjumlahkan arus beban nol dan perubahan arus yang terjadi.

Harga perubahan arus 3 fasa a-b-c pada generator sinkron silindris diselesaikan secara numerik dengan paket program bantuan Matlab 5.3. Penentuan arus peralihan pada sistem 3 fasa a-b-c dapat diperoleh dengan bantuan persamaan (10).

Gambar 6, berikut memperlihatkan hasil simulasi dari variasi arus hubung singkat terhadap waktu, untuk arus fasa a (i_{sa}), fasa b (i_{sb}) dan fasa c (i_{sc}).



Gambar 6. Simulasi respon arus hubung singkat fasa a, fasa b, dan fasa c.

Gambar 6 menunjukkan respon arus hubung singkat pada fasa a, fasa b, dan fasa c pada generator sinkron silindris, respon arus mulai dari harga tertinggi dan selanjutnya berkurang menuju kearah harga konstan, setelah beberapa saat terjadinya hubung singkat. Nilai-nilai awal arus maksimum hubung singkat berbeda pada

setiap fasa a, fasa b, dan fasa c yang proporsional secara berturut-turut terhadap $\cos \theta$, $\cos(\theta - 2\pi/3)$ dan $\cos(\theta - 4\pi/3)$, tetapi ketiga arus menurun menuju kondisi mantap dengan konstanta waktu yang sama.

Besar arus maksimum saat terjadi hubung singkat mencapai 180 Ampere kemudian

berangsur turun menuju nilai konstan sekitar 20 Ampere setelah berlangsung 8 siklus. Maksudnya terjadi peningkatan arus saat terjadi hubung singkat sebesar 9 kali arus beban penuh normalnya (20 Ampere).

Arus peralihan hubung singkat terjadi dari pertama hubung singkat menuju kondisi mantap keseluruhan membutuhkan 10 cycle. Respon arus hubung singkat baik arus fasa a (i_{sa}), fasa b (i_{sb}) dan fasa c (i_{sc}) memperlihatkan bahwa arus- arus hubung singkat ke tiga fasanya bentuknya tidak semetris selama 10 cycle pertama setelah hubung singkat terjadi.

Kesimpulan

Dari hasil simulasi genertor sinkron rotor silindris 3 fasa besaran-besaran yang penting seperti halnya arus puncak maksimum saat terjadi hubung singkat, dan banyaknya siklus penurunan arus hubung singkat dari nilai maksimum sampai nilai konstan bisa langsung didapat. Dengan kata lain dapat dikatakan bahwa analisis yang diajukan cukup efisien, karena arus puncak maksimum dan banyaknya siklus dari kondisi peralihan menuju kondisi mantap langsung dapat diperoleh.

Daftar Pustaka

- Emeritus, (1984), *Transient Phenomena in Electrical Machines*, Oxford.
- Ogbinnya I. Okoro, (2005), *Transient State Analysis of an Active Magnetic Bearing (AMB) System with Six Degree of Freedom* MATLAB, *The Pasific Journal of Science and Technology University of Negeria*, Volume 6, Number 1.
- Suwitno, (2005), *Analisis transient arus hubung singkat dua fasa pada transformator*. *Proceeding di Politeknik Brawijaya Malang*
- Yanuarsyah Haroen, dan Pekik Argo Dahono, (1984), *Analisis Motor Tak serempak Tiga Fasa Dengan Metoda Park Kompleks*, *Proceedings ITB*, Vol. 22, No.1/2/3.